

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Žáruvzdorné oceli pro energetický průmysl

Heat-resistant steels for power industry

AUTOR: Ladislav Šumský

STUDIJNÍ PROGRAM: (B2343) Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavlína Hájková Ph.D.

PRAHA 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šumský Jméno: Ladislav Osobní číslo: 437277  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávající katedra/ústav: Ústav materiálového inženýrství  
Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství  
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Žáruvzdorné oceli pro energetický průmysl**

Název bakalářské práce anglicky:

**Heat-resistant steels for power industry**

Pokyny pro vypracování:

1. Provést literární rešerši v oblasti žáruvzdorných ocelí pro energetický průmysl
2. Návrh materiálu a metodiky ověření vhodnosti vybraného materiálu pro specifické podmínky
3. Provedení experimentu a jeho vyhodnocení
4. Diskuze závěry

Rozsah práce 30-40 stran a grafické přílohy dle potřeby.

Seznam doporučené literatury:

Macek, J., Janovec, J., Jurčí, P., Zuna, P.: Kovové materiály, Nakladatelství ČVUT, Praha 2006.  
ČSN EN 10095. Oceli a niklové slitiny žáruvzdorné. Český normalizační institut, 2000.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

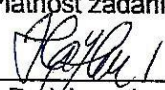
**Ing. Pavlína Hájková Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce

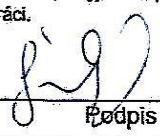
  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2017  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Žáruvzdorné oceli pro energetický průmysl“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....  
Ladislav Šumský

# Anotace

**Název práce:** Žáruvzdorné oceli pro energetický průmysl

**Autor práce:** Ladislav Šumský

**Vedoucí práce:** Ing. Pavlína Hájková Ph.D.

**Ústav:** 12132 - Ústav materiálového inženýrství

**Vedoucí ústavu:** Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

**Univerzita:** České vysoké učení technické v Praze - Fakulta strojní

Bakalářská práce se zabývá problematikou žáruvzdorných ocelí, které jsou používány v energetickém průmyslu při teplotách 800 až 1100 °C. Jedná se o feritické, austenitické, duplexní (austeniticko-feritické) oceli a žáruvzdorné slitiny niklu. V teoretické části je popsán jejich historický vývoj, rozdělení materiálů a základní definice. Dále je popsána struktura těchto materiálů a rozebrána problematika materiálů v energetickém průmyslu. Experimentální část se konkrétně zabývá vybranou ocelí 1.4828 z normy ČSN EN 10095. Tento materiál byl vystaven zcitlivění teplotami 950, 1000, 1050 a 1100 °C. Následně byla provedena mikrostrukturní analýza a ověřeny mechanické vlastnosti.

**Rozsah práce:** 42 stran, 50 obrázků, 10 tabulek

## Klíčová slova:

Žáruvzdornost, austenit, energetika, parní kotel, ocel 1.4828, ČSN EN 10095, tvrdost, mikrostruktura

# Annotation

**Title:** Heat-resistant steels for power industry

**Author:** Ladislav Šumský

**Supervisor:** Ing. Pavlína Hájková Ph.D.

**Department:** 12132 – Department of Materials Engineering

**Head of department:** Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

**University:** Czech Technical University in Prague

The bachelor thesis is about problematic of heat-resistant steels, which are used in energy industry at temperature from 800 to 1100 degrees Celsius. It is about ferritic, austenitic and duplex (ferritic-austenitic) steels and heat-resistant nickel-base alloys. The theoretical part describes steel's historical development, distribution of materials a basic definitions. The structure of these materials and problematic in energy industry is described. The experimental part deals with selected steel 1.4828 from norm ČSN EN 10095. This material was exposed to temperature sensitization of 950, 1000, 1050 and 1100 degrees Celsius. Thereafter, it was subjected to microstructural analysis and testing of mechanical properties.

**Scope of the thesis:** 42 pages, 50 pictures, 10 tables

## Keywords

Heat-resistance, austenite, energetics, steam boiler, steel 1.4828, ČSN EN 10095, hardness, microstructure

## Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Pavlíně Hájkové Ph.D., a to za celkové odborné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce a za trpělivost a čas, který byla ochotna věnovat konzultacím.

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	8
<b>1 Historický vývoj ocelí</b> .....	9
<b>2 Teoretická část</b> .....	11
2.1 Definice a struktura materiálu .....	11
2.2 Vliv přísadových prvků na strukturu .....	14
2.3 Schaefflerův diagram .....	15
2.4 Energetický průmysl .....	16
2.4.1 Materiály tepelných energetických strojů a zařízení .....	17
2.4.2 Materiály parních kotlů .....	18
2.5 Rozdělení žáruvzdorných ocelí a slitin .....	19
2.5.1 Feritické oceli .....	20
2.5.2 Austenitické oceli .....	21
2.5.3 Duplexní (austeniticko-feritické) oceli .....	23
2.5.4 Žáruvzdorné slitiny niklu .....	24
<b>3 Experimentální část</b> .....	26
3.1 Světelná mikroskopie .....	27
3.1.1 Určení velikosti zrna .....	33
3.2 Určení mechanických vlastností .....	33
3.2.1 Zkouška tvrdosti .....	34
3.2.2 Zkouška tahem .....	35
<b>4 Diskuse a závěr</b> .....	37
<b>5 Použitá literatura</b> .....	39
<b>Seznam obrázků</b> .....	41
<b>Seznam tabulek</b> .....	42

# Úvod

Žáruvzdorné oceli spadají do oblasti konstrukčních ocelí a hrají důležitou roli ve strojírenství. Vhodnou kombinací legujících prvků a vhodným tepelným zpracováním lze získat oceli s vysokou pevností, houževnatostí, pro práci za vysokých teplot, které odolávají korozi a opotřebení v agresivních provozních prostředích. Tyto oceli mají uplatnění v energetickém průmyslu, a to především na výrobu kotlových částí. Z toho plyne, že pracují za vysokých teplot, vyšších než 800 °C a musí být odolné vůči agresivním vlivům okolního prostředí. Jelikož se technika stále vyvíjí, je potřeba přizpůsobit materiál pro stále se zvyšující podmínky.

Cílem práce je vypracovat teoretickou a experimentální část. Pro teoretickou část se jedná především o studium odborných materiálů a provedení literární rešerše v oblasti žáruvzdorných ocelí pro energetický průmysl. Experimentální část je zaměřena na návrh a výběr materiálu a následné metodiky ověření vhodnosti vybraného materiálu pro určené specifické podmínky. Dále provedení a vyhodnocení experimentu, diskuse a závěr.

Pro experimentální část byla zvolena žáruvzdorná austenitická ocel 1.4828 z normy ČSN EN 10095. Na oceli byla provedena strukturní analýza a ověřeny mechanické vlastnosti při různých teplotách jejího zcitlivění.



# 1 Historický vývoj ocelí

Již na přelomu 19. století a 20. století byly studovány oceli s vyšším obsahem chromu.

První austenitická ocel byla zhotovena slitím 25 % Ni-Fe a 25 % Ni-5 ve slitinu 8 % Cr-Fe, která byla vytvořena v letech 1893-1894 ve společnosti Krupp v Německu. Krupp pokračoval ve studii problematiky sérií ocelí Ni-Cr-Fe a roku 1912 označil austenitickou ocel 20 % Cr-5 % Ni jako ocel korozivzdornou.

V roce 1910 předvedla kladenská Poldina huť ve Vídni ocel Anticorro s 10 % Ni na hlavních loveckých puškách, která se osvědčila velmi dobře. Hummelberger se snažil roku 1912 zlepšit chemickou odolnost této oceli přísadou chromu. Podroboval zkouškám austenitické oceli s různým obsahem Ni a s přísadou až 14 % Cr. Výsledkem bylo zjištění, že s obsahem chromu vzrůstá odolnost proti korozi. Po několika přihlášených patentech byla zahájena výroba niklochromové austenitické oceli AKS s 21 % Ni, 4,5 % Cr.

Na základě Erdmannových poznatků, které se zmiňují o tom, že chrom dává slitinám kovů odolnost nejen proti chemickým činidlům, ale také i proti vysokým teplotám (tj. proti opalu), se rozhodl vyzkoušet Strauss koncem roku 1910 u Kruppa žáruvzdornost několika ocelí s 10 až 29 % Cr, z nichž do některých bylo přidáno až 5 % Ni.

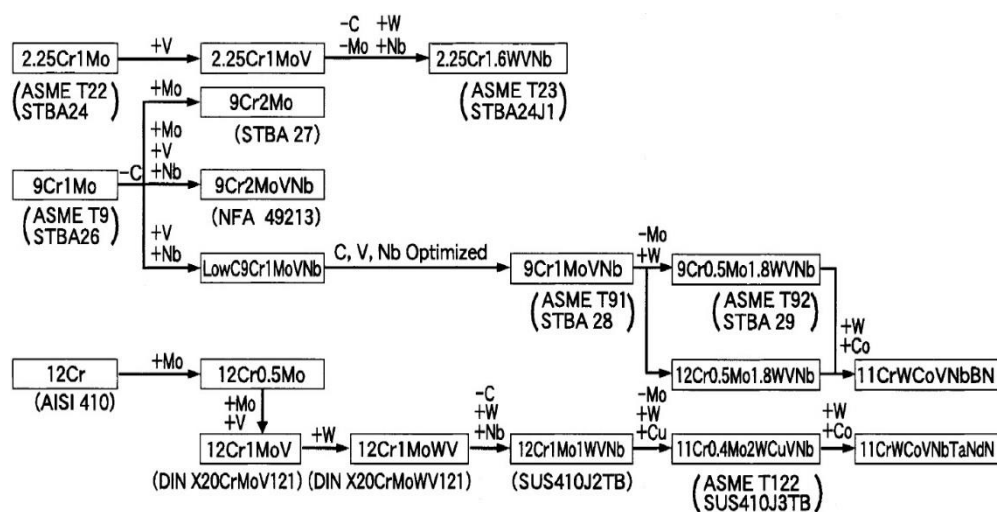
Strauss s Maurerem otiskli roku 1920 první diagram struktur chromniklových ocelí. V roce 1922 byla vytvořena další ocel označena jako V2A (V jako Versuchstahl-experimentální, 2 – číslo vyvíjené oceli, A – austenitická). Byla udáváná jako původní austenitická ocel k použití (po tepelném zpracování) na ochranu proti korozi v lodních potrubích a ve strojních zařízeních, pracujících v kyselém prostředí.

Na základě nových zkoušek v Poldině huti byl roku 1923 přihlášena patent na ocel korozivzdornou a žáruvzdornou při 1000 °C. Ocel s nárokem 0,2 až 0,8 % C, 9 až 27 % Cr, 20 až 25 % Ni. Ocel nesla označení AKC a vyráběla se podle uvedeného chemického složení prvků. Později byl zvýšen obsah chromu na zhruba asi 20 %. Ocel AKC (ČSN 17255–1.4845) se osvědčila především jako ocel žáruvzdorná. Krupp kolem roku 1930 provedl rozsáhlé vyšetření koroze a zlepšení ocelí. Výsledkem jeho práce bylo stabilizování austenitické oceli pomocí přísadových prvků.

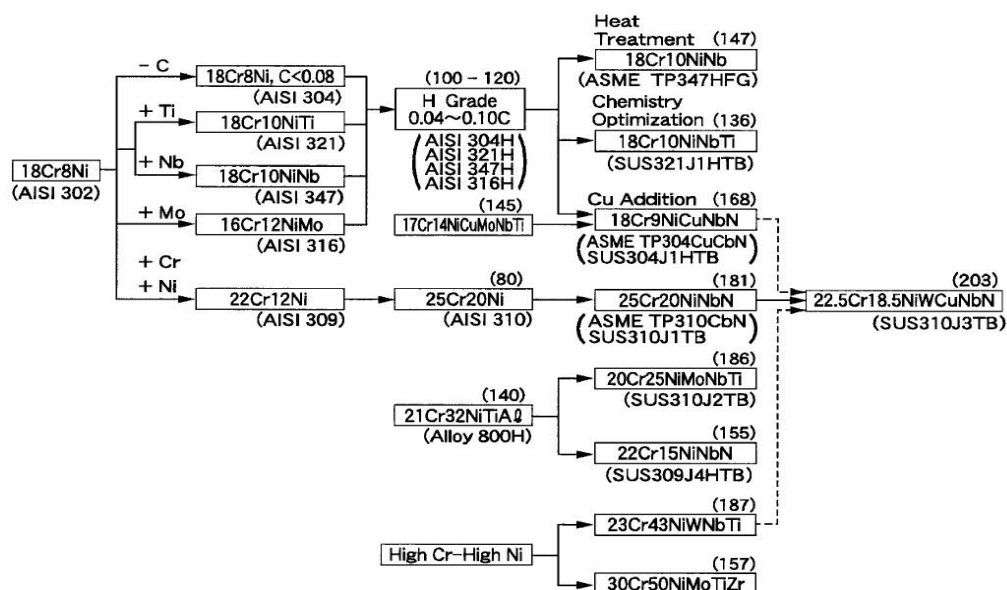
Po druhé světové válce se vyráběli v Německu oceli 18 % Cr – 8 % Ni, které byly celosvětově používány pro žáruvzdorné účely.

V 60. letech 20.stol byla provedena studie slitin austenitických ocelí pomocí vylepšeného odolného systému 18Cr-8Ni. Na začátku 70. let 20 stol. byla vyvinuta vysokoteplotní slitina A-1 pomocí prvků vytvářejících stabilizaci karbidu Ti a Nb z oceli 18 % Cr-80 % Ni, kterou následovala termo-mechanicky zpevněná TP347H s jemnější strukturou zrna, vytvořená na začátku 80. let 20. stol. označována jako TP347HFG k použití v přehřívačích páry odolných proti parní oxidaci.

Vývoj žáruvzdorných feritických a austenitických ocelí pro části parní kotle je zobrazen na obrázcích (Obr. 1 a 2). [1], [2], [3]



Obr. 1 Vývoj feritických ocelí pro parní kotle [3]



Obr. 2 Vývoj austenitických ocelí pro parní kotle [3]

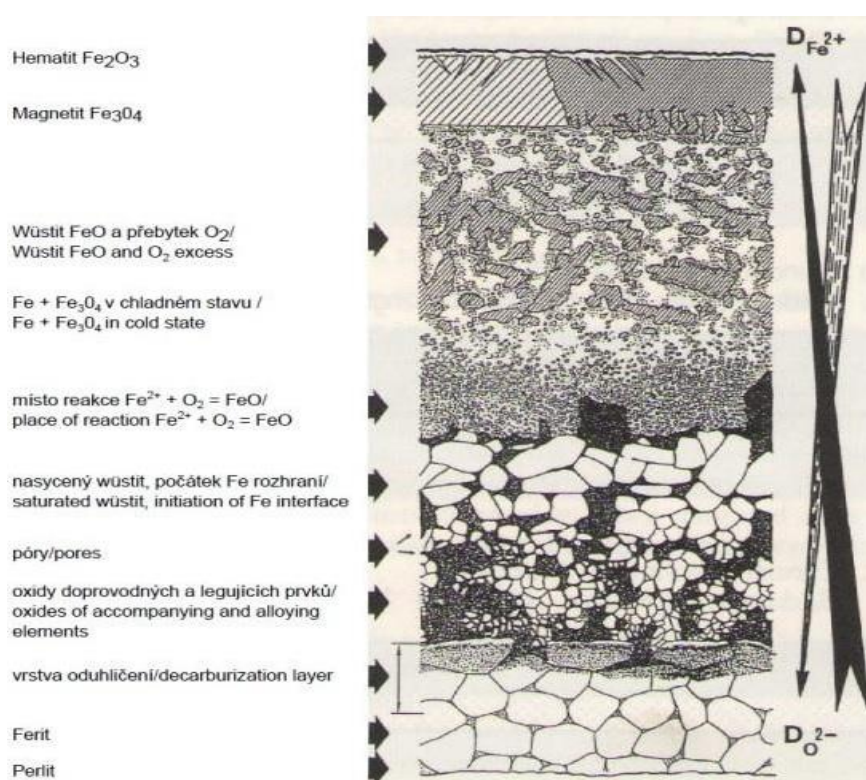
## 2 Teoretická část

### 2.1 Definice a struktura materiálu

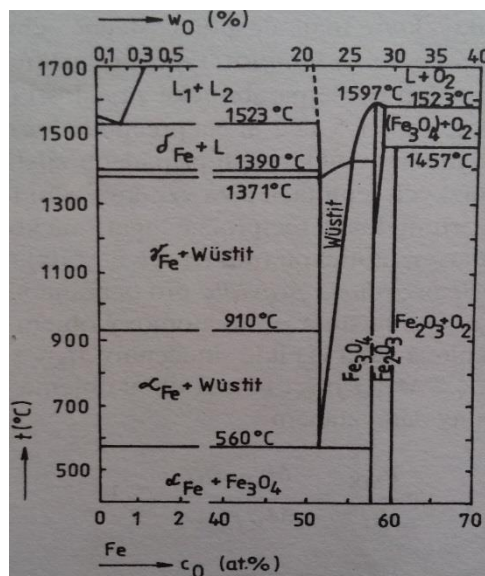
Korozivzdornost = Vlastnost materiálů se zvýšenou odolností vůči chemické i elektrochemické korozi. Korozní odolnost je založena na schopnosti tzv. pasivace povrchu železa.

Žárovzdornost = Vlastnost materiálů, které se používají při teplotách nad 550 °C (u ocelí bod tvorby wüstitu) pro svou výbornou odolnost vlivu horkých plynů a spalin, solných a kovových tavenin.

Průběhem vysokoteplotní oxidace se na povrchu oxidovaného materiálu tvoří oxidová vrstva složená z hematitu, magnetitu a wüstitu (Obr. 3). Proces, který zřejmě kontroluje rychlost oxidace je znázorněn diagramem Fe-O (Obr. 4). Z kinetických měření vyplývá, že rychlost oxidace oceli je znatelně pomalejší než rychlost oxidace čistého železa ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ ), (Obr. 5). Oxidace ocelí je doprovázena oduhličováním podpovrchových vrstev, což vede k růstu zrna. [4], [5].

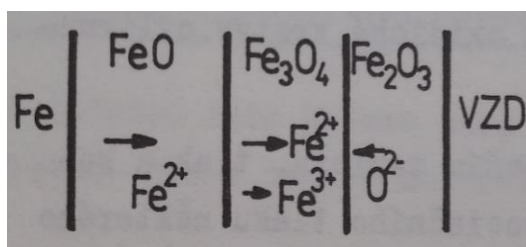


Obr. 3 Struktura okujové vrstvy [6]



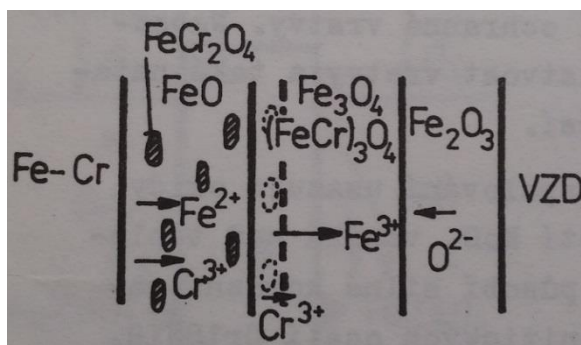
Obr. 4 Fázový diagram Fe-O [4]

Případ oxidace železa je znázorněn na obrázku (Obr. 5). Při chemické reakci mohou vzniknout tři oxidy. Kyslíkem nejbohatší  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – hematit narůstá na vně oxidické vrstvy, nejchudší na kyslík  $\text{FeO}$  – wüstit narůstá na povrchu kovu. Ve středu oxidické vrstvy je magnetit -  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Za teplot vyšších než  $570^\circ\text{C}$  začíná prudký nárůst  $\text{FeO}$ . Na rozhraní kovu a  $\text{FeO}$  vlivem spádu chemického potenciálu difundují wüstitem. Na fázovém rozhraní reagují s magnetitem. Část dvoumocných kationtů  $\text{Fe}$  difunduje společně s trojmocnými ionty vzniklými na tomto rozhraní k rozhraní s hematitem. K tomuto rozhraní také difunduje kyslík. Vzniklé reakce udržují vrstvu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na určité malé tloušťce. Za podmínek umožňujících přítomnost všech tří druhů oxidů je vrstva okují složena ze silné vrstvy porézního  $\text{FeO}$ , tenké vrstvy  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a velmi tenké vrstvy  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Složení vrstvy okují se mění s teplotou, takže jeden či dva druhy oxidů v ní nemusí být vůbec zastoupeny. [7]



Obr. 5 Schéma oxidické vrstvy a znázornění difúzního pochodu u železa [7]

Na obrázku (Obr. 6) je patrná skladba oxidické vrstvy slitiny Fe-Cr vznikající při teplotách 800-1250 °C. Vnější vrstva oxidu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  leží na  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , který obsahuje různé množství chromu v závislosti na jeho obsahu ve slitině. Vzniklý spinel lze vyjádřit vzorcem  $(\text{FeCr})_3\text{O}_4$ . Ve vrstvě wüstitu je přítomný spinel  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . Obrázek též naznačuje difúzi kationtů Fe a Cr a zpětnou difúzi kyslíku. Teplota, do které ocel odolává oxidaci, závisí na obsahu chromu (případně Si a Al tvořících spinely  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  a  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ). [7]



Obr. 6 Schéma oxidické vrstvy a znázornění difúzního pochodu u slitiny Fe-Cr [7]

Do teplot kolem 500 °C není rozdíl mezi korozní odolností nelegovaných, nízkolegovaných a středně legovaných ocelí. Nad teplotou 565 °C je oxidace železa výrazně urychlena, takže nízkolegované oceli jsou touto teplotou dlouhodobě nepoužitelné. Podstatný vliv má na odolnost proti oxidaci ocelí za zvýšených teplot, tj. na její žáruvzdornost, také nikl. Protože Ni je ušlechtlejší než Fe, oxiduje v povrchové vrstvě železo přednostně. Tím pod tenkou vrstvou oxidů stoupá koncentrace Ni, který zpomaluje difúzi Fe a tím brzdí nárůstu oxidů. Pokud vede jeho koncentrace ke vzniku austenitické struktury, která se vyznačuje zvýšenou žáruvzdorností, hraje nikl významnou roli.

Z již popsaného vyplývá, že složení a kinetiku růstu oxidické vrstvy ovlivňuje řada činitelů.

Z vnějších faktorů ovlivňují žáruvzdornost především teplota, tlak a korozní prostředí.

Větší význam má složení korozního prostředí, které může způsobit změnu mechanických vlastností ochranné vrstvy. Nebezpečná jsou především prostředí, které narušují celistvost ochranné vrstvy.

Z vnitřních faktorů na žáruvzdornost působí [7]:

- Mikrostruktura, nejpříznivější jsou homogenní fáze, z nich austenit.
- Metalurgická čistota, vměstky podporují lokální oxidaci.
- Stav povrchu kovu, lesklý povrch je při vysokých teplotách žáruvzdornější, nečistoty, mastnota a zbytky brusiva podporují oxidaci.

## 2.2 Vliv přísadových prvků na strukturu

Oceli s vysokým obsahem chromu, niklu, manganu, a dalších přísad a prvků jsou nenahraditelnými konstrukčními materiály. Patří mezi ně především oceli feritické a oceli austenitické. Legujícími prvky ovlivňujeme takové vlastnosti ocelí, jako jsou odolnost proti korozi, žáruvzdornost, fyzikální vlastnosti a další. Např. chrom a křemík jsou prvky feritotvorné. Nikl a mangan spolu s uhlíkem jsou prvky austenitotvorné a rozšiřují oblast austenitu směrem k nízkým teplotám. Výsledná struktura je proto závislá na množství a vzájemném poměru jednotlivých přísad. Slitinové prvky v austenitických ocelích je nutno rozlišovat podle jejich vlivu na strukturu (austenitotvorné a feritotvorné) a podle toho, jaké mechanické, korozní a jiné vlastnosti mají zaručit. [4], [8]

Chrom patří do skupiny feritotvorných prvků a stabilizuje austenitickou, ale i feritickou matici. Zajišťuje antikorozi odolnost v oxidačních prostředích. V ternárních slitinách železo-chrom-uhlík se část chromu rozpustí v základní kovové matici, část tvoří s uhlíkem karbidy. Při použití chromu v nerezových ocelích, kdy se má zaručit schopnost pasivace povrchu při styku s oxidačním prostředím, musí být v tuhém roztoku rozpuštěno minimálně 11,7 % chromu. [4], [8]

Nikl patří mezi austenitotvorné prvky a stabilizuje austenitickou matici i za nízkých teplot a také při plastické deformaci. Nikl zvyšuje pevnost více než chrom, ale méně než mangan a křemík. zvyšuje korozní odolnost za vysokých teplot a v redukčních kyselinách. [4], [8]

Mangan je austenitotvorný prvek a cca nad 3 % účinně přispívá k potlačení praskavosti svarů. Přísada Mn stabilizuje ale po ochlazení strukturu existující za tepla, a tak např. ocel se 13 % Cr a 0,01 % C, která se stává po ochlazení z 1000 °C při běžném obsahu Mn martenzitickou, v případě 15 % Mn je zcela austenitická. Za přítomnosti 3 až 7 % Ni a 0,15 až 0,25 % N umožňuje Mn o obsahu 5,5 až 10 % udržení austenitické struktury s obsahem Cr do 19 %. [8]

Křemík patří do skupiny silně feritotvorných prvků. Křemík netvoří v ocelích karbidy, ale úplně se rozpouští ve feritu, jehož pevnost zvyšuje. Snižuje odolnost ocelí ve vroucí kyselině dusičné (65 %  $\text{HNO}_3$ ). Při obsahu okolo 3 až 4 % odstraňuje náchylnost k mezikrystalové korozi, celkově posiluje antikorozi odolnost ve vroucí vysoce koncentrované  $\text{HNO}_3$  (více než 80 %) a v prostředí dané kyseliny s přísadou oxidačních látek. [4], [8]



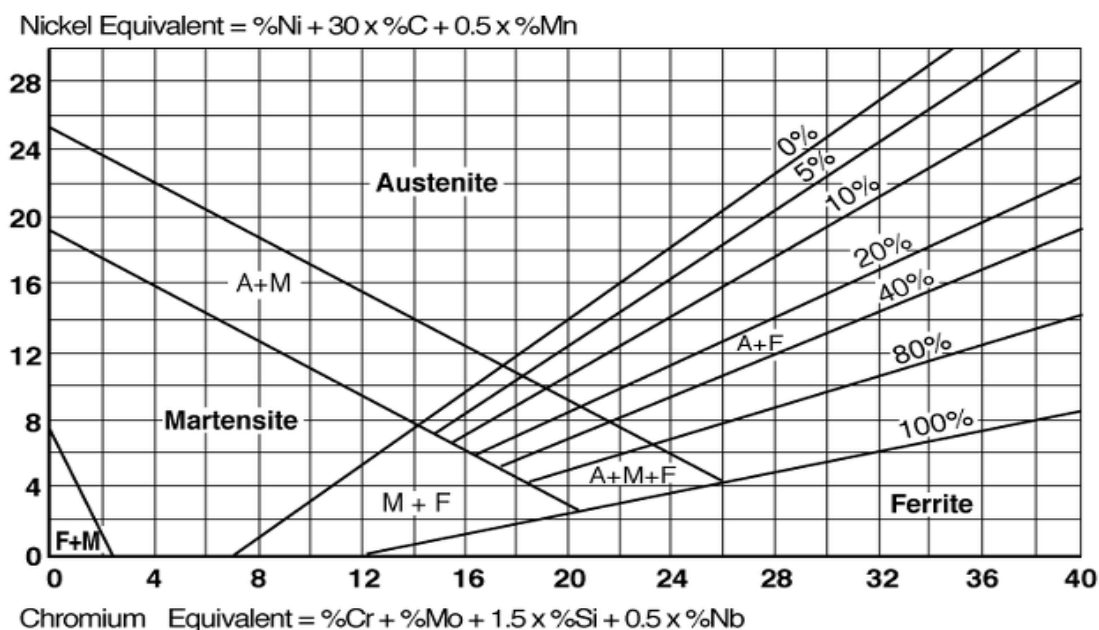
Uhlík zvyšuje pevnostní úroveň, stabilizuje austenit po deformaci za studena. Ovlivňuje ale náchylnost k mezikrystalové korozi, a proto je, nejen pro vazbu na Cr, jeho vyšší obsah nežádoucí. [8]

Dusík je rovněž austenitotvorný prvek, zpevňuje austenitickou matici bez nepříznivého vlivu na mezikrystalovou korozi do obsahu 0,2 %, stabilizuje austenit i při tváření za studena a společně s Mo zvyšuje odolnost proti šterbinové a bodové korozi. [8]

Hliník je silným dezoxidačním činidlem, je feritotvorný a podporuje žáruvzdornost. [8]

## 2.3 Schaefflerův diagram

Schaefflerův diagram znázorňuje vliv feritotvorných a austenitotvorných prvků na strukturu ocelí (Obr. 7). Větší nebo menší účinek ostatních prvků se vyjadřuje jako násobek. Pro skupinu prvků, uzavírajících oblast gama, byl zaveden pojem ekvivalent chromu (CrE). Jedná se o feritotvorné (karbidotvorné) prvky (Si, Mo, V, Ti, Al, Nb, Cr, W). Pro pojem ekvivalent niklu (NiE), jde o austenitotvorné prvky (Ni, Mn, N, Cu, C). Z diagramu je zřejmé, že zásadní vliv na strukturu po volném vychladnutí mají chrom a nikl. Pro určité typy ocelí existuje několik typů výpočtu chrom – niklových ekvivalentů, avšak každý dává poněkud odlišné výsledky. [4]



Obr. 7 Schaefflerův diagram [9]

## 2.4 Energetický průmysl

Energetika je průmyslové odvětví, které se zabývá získáváním, přeměnou a distribucí všech forem energie. Jedná se zejména o výrobu elektrické energie v elektrárnách a její distribuci prostřednictvím přenosové soustavy. [10]

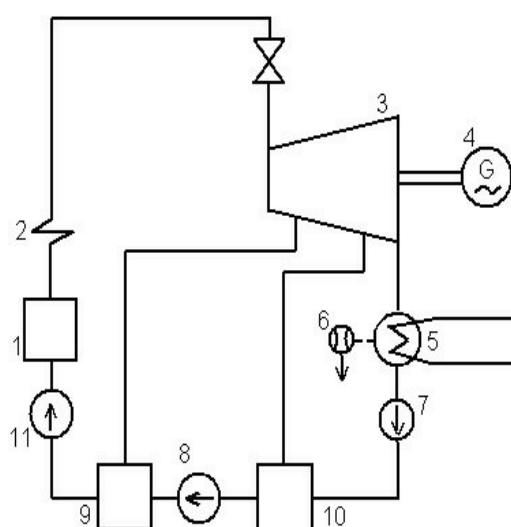
### Tepelné elektrárny

Tepelná elektrárna je výrobní elektrická energie, tj. elektrárna. Jedná se o technologický celek, který vyrábí elektrickou energii přeměnou z chemické energie vázané v palivu (či jiného vhodného zdroje energie) prostřednictvím tepelné energie.

Obvykle je termínem „tepelná elektrárna“ označována spalovací elektrárna spalující běžné fosilní palivo (zpravidla uhelná elektrárna, případně plynová elektrárna nebo ropná elektrárna). Na principu tepelné elektrárny pracují i další typy elektráren, které využívají principu změny tepelné energie na elektrickou (kupř. jaderné elektrárny, geotermální elektrárny, tepelné sluneční elektrárny aj.). [11]

### Uhelné elektrárny

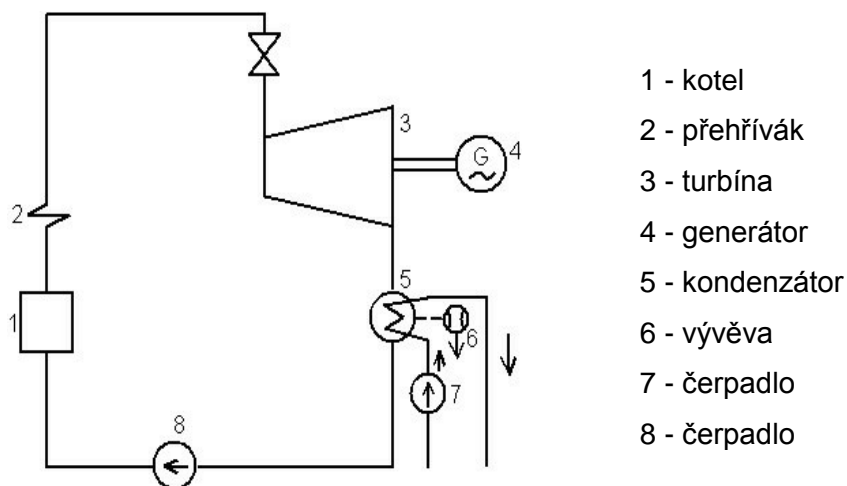
Výroba elektrické energie v moderních elektrárnách je složitý technologický proces, na jehož konci je nejen elektrická energie, ale i produkty vzniklé spalováním uhlí, které se podílejí na znečišťování ovzduší. V uhelných elektrárnách se spalováním uhlí získává tepelná energie, která se předává vodě. Vyvíjí se pára, ta roztáčí parní turbínu a ta zase alternátor vyrábějící elektřinu. Na stejném principu pracují vedle uhelných elektráren i elektrárny spalující mazut nebo zemní plyn. Uhelné elektrárny dělíme na kondenzační (Obr. 9 a 10) a na teplárny. [11]



- |                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| 1 – kotel       | 7 – čerpadlo            |
| 2 – přehříváč   | 8 – čerpadlo            |
| 3 – turbína     | 9 – vysokotlaký ohříváč |
| 4 – generátor   | 10 – nízkotlaký ohříváč |
| 5 – kondenzátor | 11 – čerpadlo           |
| 6 – vývěva      |                         |

Obr. 8 Schéma kondenzační elektrárny s regeneračním ohřevem vody [11]





Obr. 9 Schéma parní elektrárny [11]

### 2.4.1 Materiály tepelných energetických strojů a zařízení

Podobně jako v jiných oblastech splňují materiály na výrobu tepelných energetických strojů a zařízení některé všeobecné či specifické požadavky na vlastnosti.

Volba optimálního materiálu a způsobu jeho technologického zpracování musí bezpodmínečně zohlednit předpokládané funkce celého zařízení nebo konstrukci jako celku a specifické funkce konkrétních částí v nich.

Pro volbu materiálu jsou určující pracovní podmínky strojní součásti. Proto jsou úvahy o volbě materiálu nevyhnutelné už v počáteční fázi konstrukčního řešení strojů a zařízení. Doporučuji se takového schéma postupu [12]:

1. Návrh koncepce řešení, objasnění povahy a hladiny namáhání součástí.
  - a. Interval pracovních teplot
  - b. Mechanické namáhání a jeho předběžná hladina
    - Statické, dynamické, cyklické
    - Tahové, tlakové, ohybové, krutové
  - c. Tření a opotřebení
  - d. Koroze – povaha korozního prostředí, korozní podmínky, možné druhy korozního napadení
  - e. Požadavky na fyzikální vlastnosti a jejich předpokládané hodnoty
2. Určení nejdůležitějších vlastností součástí.
3. Základní představa o způsobu výroby součástí a první ekonomické úvahy.
  - a. Východiskový polotovár – plech, profil, tyč, výkovek, odlitek, svařenec
  - b. Technologie výroby – tváření (za studena, za tepla), lití, svařování, tepelné zpracování, povrchové úpravy
4. Hlavní technologické vlastnosti existujících materiálů

5. Užší výběr konkrétních materiálů splňující body 2. až 4.
6. Ekonomický rozbor a vyhodnocení navrhnutých variant a alternativ řešení problému výroby součástí
7. Výběr optimálního řešení z technického i ekonomického hlediska

Materiály tepelných energetických strojů a zařízení se rozdělují do těchto základních skupin [12]:

1. Ocele na parní kotle
2. Ocele na parné turbíny
3. Ocele na turbogenerátory
4. Ocele na plynové turbíny

#### 2.4.2 Materiály parních kotlů

Části parního kotle se vyrábějí ze žáruvzdorných materiálů. Požadavky na žáruvzdornost a ostatní vlastnosti jsou téměř totožné pro všechny části kotle, výjimku tvoří pláště a víka. Hlavní části musí být schopny odolávat teplotě 800 až 1200 °C. [13]

Na obrázku (Obr. 9 a 10) v kapitole 2. 4. jsou popsána pracovní schémata tepelných elektráren, kde se tyto materiály používají. Důležité jsou zejména body 1, 2, 9 a 10 z legendy na obrázku (Obr. 9) a body 1 a 2 z legendy na obrázku (Obr. 10). Z hlediska této práce, ve které se dále budu zabývat částmi, jejichž pracovní teplota se pohybuje okolo 1000 °C byly vybrány z normy ČSN EN 10095 některé vhodné materiály pro tyto části parního kotle. Chemické složení těchto materiálů popisuje následující tabulka (Tab. 1).

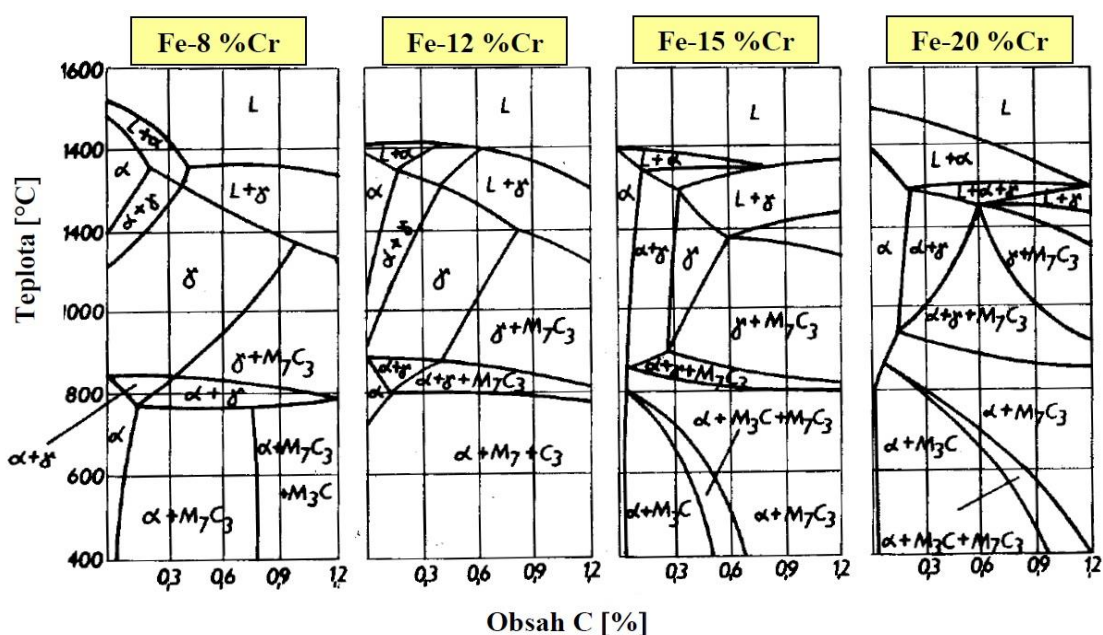
Tab. 1 Chemické složení materiálů pro části parních kotlů [5]

Značka	Chemické složení v %								
	C max.	Si	Mn max.	P max.	S max.	Cr	Al	Ni	N max.
1.4762	0,12	0,7-1,4	1	0,04	0,015	23-26	1,2-1,7		
1.4821	0,1-0,2	0,8-1,5	2,0	0,04	0,015	24,5-26,5		3,5-5,5	0,11
1.4828	0,2	1,5-2,0	2,0	0,045	0,015	19-21		11-13	0,11
1.4845	0,1	max. 1,5	2,0	0,045	0,015	24-26		19-22	0,11
1.4886	0,15	1-2	2,0	0,03	0,015	17-22		33-37	0,11

## 2.5 Rozdělení žáruvzdorných ocelí a slitin

Oceli, které obsahují více než 5 % Cr, jsou nejjednodušším typem materiálů, se zvýšenou korozní odolností a o vyšší pevnosti při vyšších teplotách ve srovnání např. s nízkolegovanými oceli. Kombinací Cr, Fe a dalších legujících prvků vzniknou oceli označené jako nerezavějící, resp. korozivzdorné. Celá řada těchto ocelí z této oblasti má uplatnění jako žáruvzdorné.

Klíčovým legujícím prvkem je chrom. Přísady dalších elementů jako je nikl, křemík, molybden, vanad, titan atd. zesilují pozitivní účinky chromu. Přísada uhlíku v ternárním diagramu Fe-Cr-C je znázorněna na obrázku (Obr. 10), kde jsou uvažovány odstupňované obsahy Cr od 8 do 20 %. [8]



Obr. 10 Ternární diagram Fe-Cr-C pro obsahy 8, 12, 15 a 20 % Cr [8]

Struktura korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí je určena poměrem feritotvorných a austenitotvorných legujících prvků. Oceli jsou rozděleny do následujících skupin:

### a) feritické chromové oceli

Feritické oceli obsahují jako hlavní legující prvek Cr (do 30 %). V závislosti na obsahu Cr a C může být struktura plně feritická nebo obsahuje podíly přechodových struktur martenzitu nebo perlitu. Žáruvzdorné ferity obsahují do 0,12 % C a pro zlepšení odolnosti proti opalu Al a Si. Plné ferity mají při teplotách nad 950 °C náchylnost na snížení houževnatosti tvorbou hrubého zrna, které není možné ovlivnit tepelným zpracováním. [7]

b) austenitické oceli

Největší význam mají Cr a Ni jako hlavní legující prvky. Pro zvýšení odolnosti proti korozi a žáruvzdornosti mohou být dolegovány dalšími prvky. [8]

c) austeniticko-feritické oceli (duplexní)

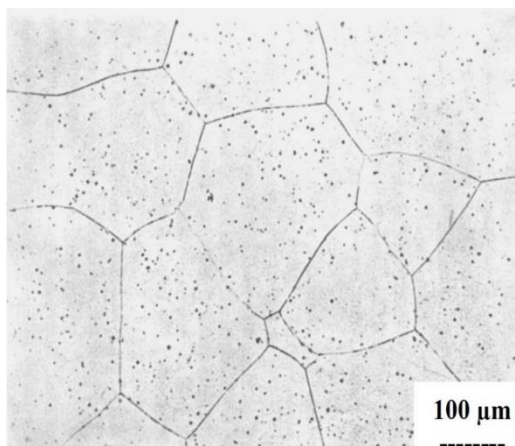
Podíl feritu ve struktuře oceli, jehož množství je především dáno poměrným zastoupením feritotvorných prvků, se pohybuje podle typu oceli zhruba mezi 30 až 50 %. Podíl feritu ve struktuře oceli závisí však nejen na chemickém složení, ale i na tepelném zpracování. [4]

d) Žáruvzdorné slitiny niklu

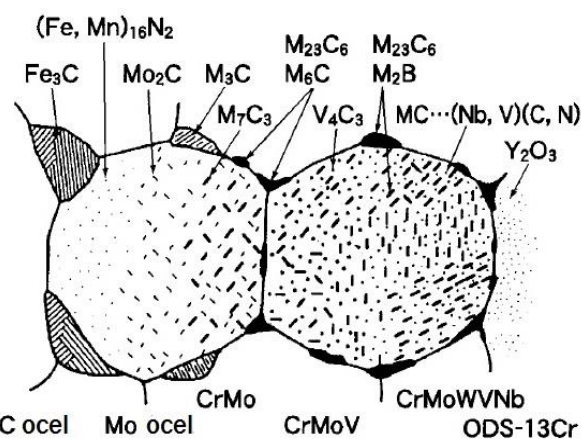
Žáruvzdorné niklové superslitiny jsou na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe. Základním přísadovým prvkem je chrom, který udržuje žáruvzdornost. Obsah Cr se pohybuje v rozmezí od 15 do 30 %. Obsah Fe se v úsporné ternární bázi pohybuje do 20 %. [4]

### 2.5.1 Feritické oceli

Obsahují 11,5 až 30 % Cr. Díky této konstituci nezasahují do oblasti austenitu a pokrývají pouze oblast čistého feritu. Vzhled mikrostruktury korozivzdorné feritické oceli s vyšším nebo nižším obsahem precipitátů karbidů chromu rozptýlených ve feritické matici je uveden na obrázku (Obr. 11 a 12). [8]



Obr. 12 Vzhled mikrostruktury feritické korozivzdorné oceli [8]



Obr. 11 Vzhled mikrostruktury feritické korozivzdorné oceli [3]

Feritické nerezavějící oceli se zpracovávají obvykle žíháním na teplotě 760 až 830 °C. Uplatňuje se u nich např. žíhání na odstranění pnutí po svařování anebo po deformaci za studena. Při delších výdržích nad teplotou 1000 °C dochází u nich k hrubnutí feritického zrna a ke zkřehnutí matrice. Chemické složení těchto ocelí popisuje následující tabulka (Tab. 2). [8]

Daný typ oceli vykazuje následující pozitivita [8]:

1. Velmi dobrou korozivzdornost, vysokou žáruvzdornost (závisí na obsahu chromu) i do teploty 950 až 1100 °C.
2. Příznivá cena.
3. Dobrá odolnost proti korozi pod napětím v prostředí chloridových iontů, proti bodové a štěrbinové korozi.

Negativa [8]:

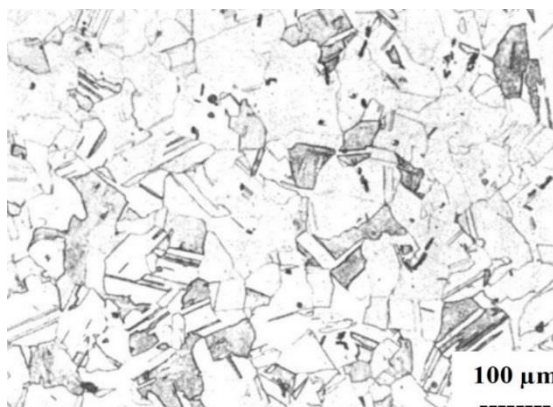
1. Nižší úroveň vrubové houževnatosti.
2. Citlivost k interkrystalické korozi (koroze po hranicích zrn).
3. Vznik intermetalické fáze  $\sigma$ .

Tab. 2 Chemické složení žáruvzdorných feritických ocelí [5]

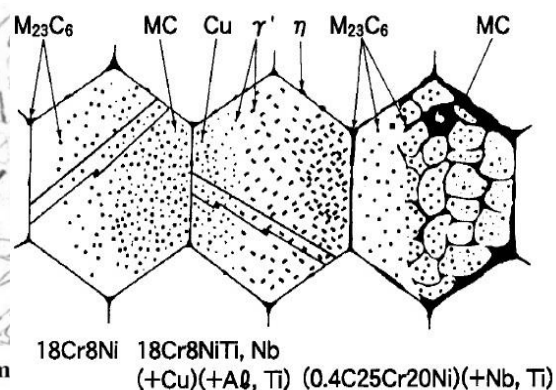
Značení	Chemické složení v %						
	C max.	Mn max.	Si	Cr	Al max.	P max.	S max.
1.4713	0,12	1,0	0,5-1,0	6–8	0,5-1,0	0,04	0,015
1.4742	0,12	1,0	0,7-1,4	17–19	0,7-1,2	0,04	0,015
1.4749	0,15-0,2	1,0	1,0	26-29		0,04	0,015
1.4762	0,12	1,0	1,0	23-26	1,2-1,7	0,04	0,015

### 2.5.2 Austenitické oceli

Austenitické oceli mají mezi korozivzdornými a žáruvzdornými oceli dominantní postavení (přes 70 % produkce těchto ocelí). Přidáním niklu k základní Fe-Cr bázi nejen vzrostla odolnost elektrochemické a plyné korozi, ale také se stabilizovala kubická plošně středěná mřížka (fcc). Tyto oceli mohou být stabilní v oblasti nízkých teplot, pevné při zvýšených teplotách, dobře tvářitelné a nejsou feromagnetické. Jsou odolnější proti oxidaci za vysokých teplot než feritické vysokochrómové či poloferitické oceli. Vzhled mikrostruktury austenitické oceli je vidět na obrázku (Obr. 13 a 14). [7]



Obr. 13 Vzhled mikrostruktury austenitické korozivzdorné oceli po rozpouštěcím žihání [8]



Obr. 14 Vzhled mikrostruktury austenitické korozivzdorné oceli [3]

Jedná se o oceli, které mohou být různého typu, podle chemické konstituce [9]:

Chrómniklové – s 12 až 25 % Cr, 8 až 38 % Ni, 0,01 až 0,15 % C, příp. legované N nebo Mo, Cu, Si, event. stabilizované Ti a Nb s cílem zvýšit mechanické vlastnosti a korozní odolnost.

Chrómmanganniklové – s 12 až 22 % Cr, 5 až 12 % Mn, 3 až 8 % Ni, 0,02 až 0,15 % C, legované N, Mo nebo Cu, případně stabilizované Ti a Nb. Oceli vykazují vyšší mechanické parametry i korozní odolnost za specifických podmínek.

Chrómmanganové – s 10 až 18 % Cr, 14 až 25 % Mn, 0,02 až 0,08 % C, bývají legované N, Mo, Cu a event. legované Ti a Nb

Chemické složení austenitických ocelí je uvedeno v následující tabulce (Tab. 3)

Tab. 3 Chemické složení austenitických žáruvzdorných ocelí [5]

Značka	Chemické složení v %								
	C max.	Si	Mn max.	P max.	S max.	Cr	Ni	N max.	Jiné
1.4828	0,2	1,5-2,0	2,0	0,045	0,015	19-21	11-13	0,11	
1.4845	0,1	max. 1,5	2,0	0,045	0,015	24-26	19-22	0,11	
1.4887	0,15	1-2	2,0	0,03	0,015	20-23	33-37	0,11	Nb: 1-1,5

Daný typ oceli vykazuje následující pozitivita:

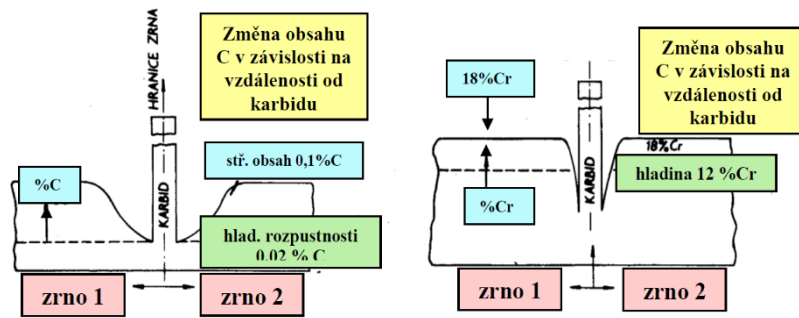
1. Vykazují vynikající antikorozi odolnost i za vysokých teplot.
2. Vrubová houževnatost i za nízkých teplot dosahuje vysoké úrovně.
3. Vykazuje vysoký koeficient deformačního zpevnění z Ramberg-Osgoodova vztahu (souvisí s vysokou úrovní vrubové houževnatosti).

Negativa:

1. Vyšší cena.

Dalším negativem je náchylnost těchto ocelí ke zcitlivění, které je spojováno s přednostní precipitací karbidů typu  $M_{23}C_6$ , např.  $(FeCr)_3C_6$  na hranicích austenitických zrn. Vznikem těchto hrubých karbidů dochází v jejich těsné blízkosti k ochuzení austenitické matrice o chrom, který může i podkročit kritickou hodnotu zaručující korozivzdornost (tj. 12 % Cr) a v této ochuzené zóně pak začíná korozní napadení austenitické matrice. Schematicky je daný proces znázorněn na obrázku (Obr. 15). [8]

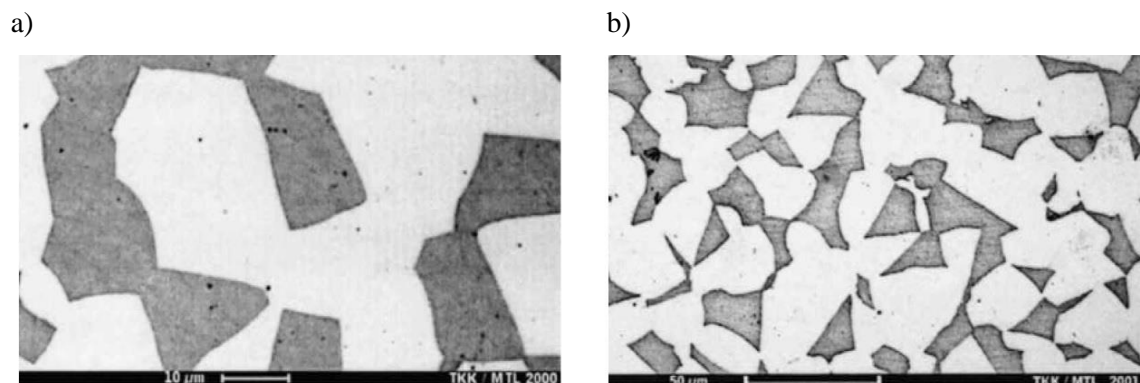




Obr. 15 Schematické znázornění přerozdělení uhlíku a chromu v oblasti vyloučeného karbidu na hranici zrna [8]

### 2.5.3 Duplexní (austeniticko-feritické) oceli

Tento typ ocelí je charakterizován 30 až 50 % austenitické matrice, zbytek podílu vždy připadá na feritickou. Lze je tedy rozdělit do dvou skupin, a to na duplexní oceli se základní austenitickou maticí anebo feritickou maticí, pokud nejde o variantu 50 na 50. Převládající podíl té či oné matrice také rozhoduje o finálních vlastnostech daného typu ocelí. Podíl feritické struktury je závislý na chemickém složení a způsobu tepelného zpracování. Slitinové prvky nejsou mezi oběma fázemi rozděleny rovnoměrně. Austenitotvorné prvky se soustřeďují více v austenitu a naopak. Hodnota rozdělovacího koeficientu je závislá na chemickém složení (Tab. 4) a teplotě žhání. Duplexní oceli mají velmi nízké obsahy uhlíku minimálně 18 % Cr, více jak 4,5 % Ni. Příklad mikrostruktury duplexní oceli je prezentován na obrázku (Obr. 16). [8]



Obr. 16 Příklad mikrostruktury duplexní oceli (základní materiál) z teploty 1020 °C ochlazená a) do vody, b) s rychlostí ochlazování 20 °C.s<sup>-1</sup> [8]

Pozitiva:

1. Vykazují zhruba dvojnásobné hodnoty pevnostních charakteristik ve srovnání se standardními nerezavějícími austenitickými oceli.
2. Korozní odolnost je prakticky srovnatelná s korozivzdorností austenitických ocelí.
3. Náchylnost ke zcitlivění je nižší než v případě austenitických korozivzdorných ocelí.

4. Jsou také velmi dobře svařitelné (bez trhlin).

Negativem duplexních ocelí [8]:

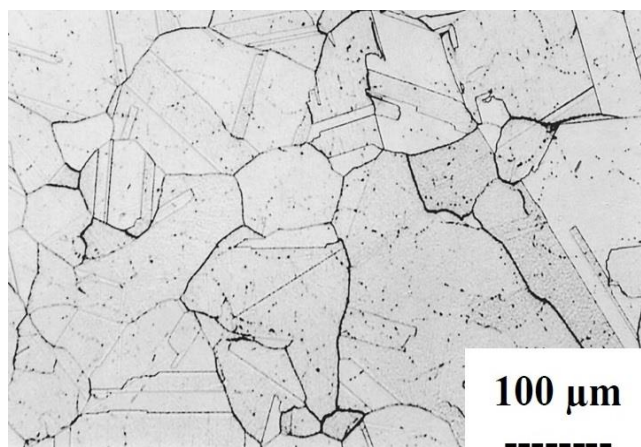
1. Náchylnost k vývinu křehkosti po žíhání při teplotě 475 °C.
2. Častý rozvoj anizotropie vlastností.
3. Výrazná přechodová oblast v teplotní závislosti vrubové houževnatosti se zvyšujícím se podílem feritu.
4. Náchylnost na zcitlivění, zejména v teplotním intervalu 500 až 700 °C.

Tab. 4 Chemické složení austeniticko-feritické žáruvzdorné oceli [5]

Značení	Chemické složení v %							
	C	Si	Mn max.	P max.	S max.	Cr	Ni	N max.
1.4821	0,1-0,2	0,8-1,5	2,0	0,04	0,015	24,5- 26,5	3,5- 5,5	0,11

#### 2.5.4 Žáruvzdorné slitiny niklu

Slitiny na bázi niklu jsou převážně austenitické struktury. Navazují na austenitické chromniklové oceli s obsahem 8-29 % Ni, který ve slitinách niklu stoupá až do 80 % Ni. Obsah chromu nad 15 % zajišťuje jejich pasivaci. Slitiny Ni-Cr-Fe bývají modifikovány pro zvýšení korozní odolnosti a zlepšení ostatních vlastností dalšími prvky včetně několika procent molybdenu a mědi. Skupina Ni-Mo-Cr má vyšší obsah molybdenu, což zvyšuje odolnost i v redukčním prostředí. Při vyšším obsahu chromu je zajištěna odolnost i v prostředí oxidačním. Mikrostrukturu slitiny Ni-Cr-Fe znázorňuje obrázku (Obr. 17). Chemické složení těchto slitin je uvedeno v následující tabulce (Tab. 5). [4]



Obr. 17 Vzhled mikrostruktury žáruvzdorné niklové slitiny Ni-Cr-Fe [13]



Tab. 5 Chemické složení žáruvzdorných niklových slitin [5]

Značení	Chemický podíl v %								
	C	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Ni min.	Cr	Fe max.	Al max.
2.4816	0,05- 0,10	1,0	0,50	0,02	0,015	72	14-17	6,00- 10,00	0,30
2.4951	0,08- 0,15	1,0	1,00	0,02	0,015	Zbytek	18-21	5,0	0,30

Dále se v niklových slitinách nachází max. 1,5 % Co, max. 0,6 % Ti, max. 0,5 % Cu a jiné prvky jako například Nb, B a Ce.

### 3 Experimentální část

Z normy ČSN EN 10095 byl vytipován materiál 1.4828. Chemické složení a mechanické vlastnosti této oceli jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 6 a Tab. 7) [14]. Na oceli byla provedena strukturní analýza a ověřeny mechanické vlastnosti při různých teplotách jejího zcitlivění (950, 1000, 1050, 1100 °C).

Zkoumaná ocel 1.4828 byla dodána formě tyče o průměru 10 mm, která byla válcována za tepla. Z tyče bylo nařezáno 5 sad vzorků po 3 kusech. Nařezané vzorky měly rozměr  $\varnothing 10 \times 100$  mm. Čtyři sady vzorků byly následně zcitlivěny při teplotách 950, 1000, 1050 a 1100 °C po dobu 24 hodin v peci LAC LH 30/13. Experiment pro teplotu 950 °C se nezdařil, jelikož po neznámém časovém intervalu se vypnula pec a vzorky tudíž byly znehodnoceny a pro další operace se staly nepoužitelnými. Pro zopakování pokusu nezbyl další materiál.

Tab. 6 Předpis chemického složení oceli 1.4828 [14]

Značka	Chemické složení v %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Jiné
1.4828	max. 0,2	1,5-2,0	max. 2,0	max. 0,045	max. 0,015	19-21	11-13	max. 0,11	

Tab. 7 Předpisy mechanických vlastností oceli 1.4828 [14]

Mechanické vlastnosti	
Rozměr t [mm]	Ploché výrobky $t \leq 75$
stav	Po rozpouštěcím žíhání
Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa] min.	230
Mez kluzu $R_p 0,1$ [MPa] min.	270
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	550-770
Tažnost A [%]	30
Kontrakce Z [%]	-
Nárazová práce [J]	-
Tvrdost HB max.	223

### 3.1 Světelná mikroskopie

Mikrostrukturní analýza byla prováděna světelnou mikroskopií na metalografickém mikroskopu Carl Zeiss Neophot 32 a makrostrukturní na stereomikroskopu Nikon SMZ 1500.

Po standardní metalografické přípravě (broušení, leštění) byly vzorky hodnoceny na metalografickém mikroskopu v leštěném (obr. 18-33) a následně v elektrolyticky naleptaném stavu (10 ml HCl + 90 ml methanol, 6 V, 6–8 vteřin) jak v příčném (PN), tak podélném (PO) směru (Obr. 34-48) K pořízení fotografií mikrostruktur byl použit software NIS – Elements AR.

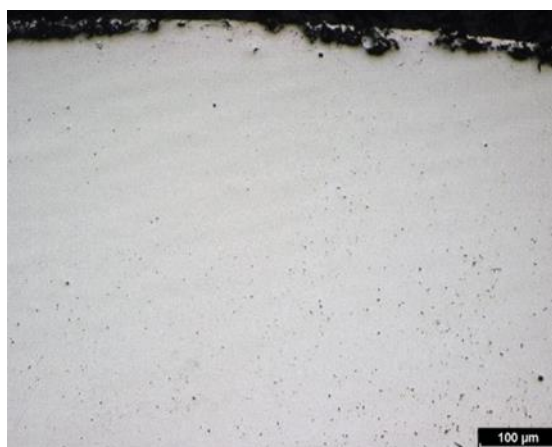
Na mikrostrukturách v leštěném stavu si lze všimnout oxidických vměstků, které jsou charakteristické svým kulovitým tvarem. V závislosti na zvyšující se teplotě zcitlivění, je možné vidět, že jejich četnost a velikost postupně klesá. Naopak se po povrchu začínají vytvářet kulovité táhlé tvary (Obr. 32).

Mikrostruktura oceli je austenitická. S rostoucí teplotou zcitlivění lze při velkých zvětšeních sledovat karbidy po hranicích zrn, které je možné při 1100 °C sledovat i uvnitř austenitických zrn.

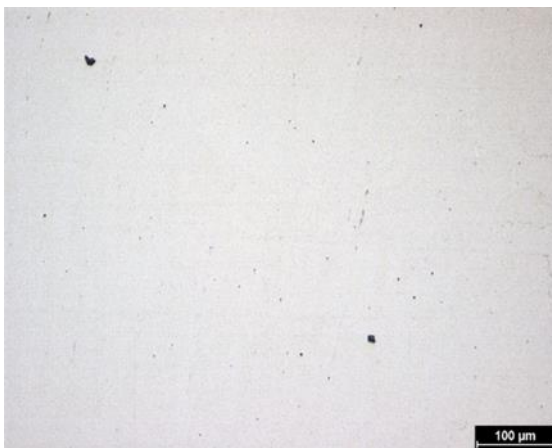
Dále byla sledována velikost zrna. Při pokojové teplotě byla jejich velikost po celé ploše vzorku stejná ( $G = 7,5$ ), (Obr. 34, 35). U vzorků, které byly zcitlivěny při teplotě 1000 °C byla velikost stále stejná ( $G = 7,5$ ), (Obr. 36-39). U vzorků zcitlivěných při teplotě 1050 °C je již patrná povrchová vrstva zhrubnutých zrn ( $G = 3,0$ ) sahajících až do hloubky 0,51 mm (Obr. 40-43). U vzorků zcitlivěných při teplotě 1100 °C zhrublo zrno po celé ploše vzorku ( $G = 1 - 1,5$ ), (Obr. 44-48).



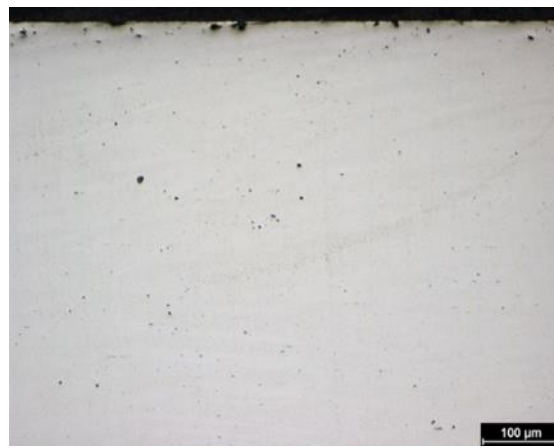
Obr. 18 Pokojová teplota - jádro - PN



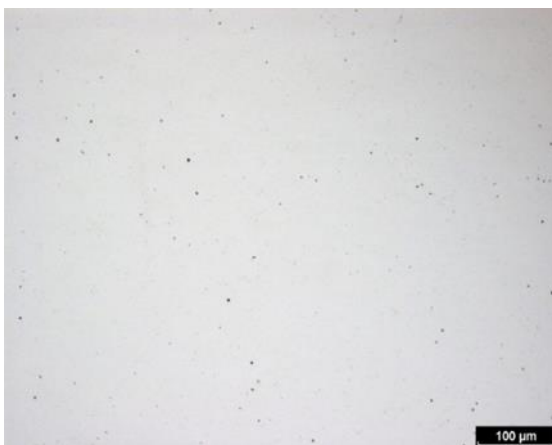
Obr. 19 Pokojová teplota - povrch - PN



Obr. 20 Pokojová teplota - jádro - PO



Obr. 21 Pokojová teplota - povrch - PO



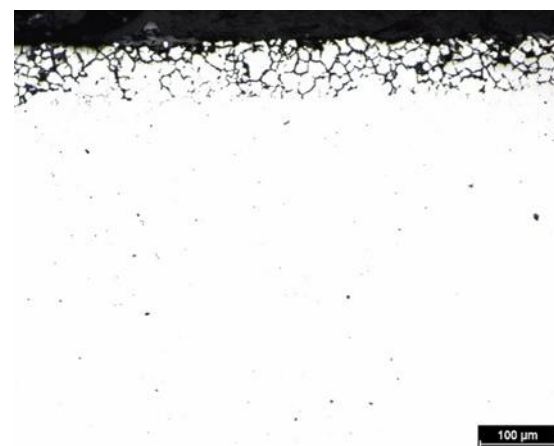
Obr. 22 1000 °C - jádro - PN



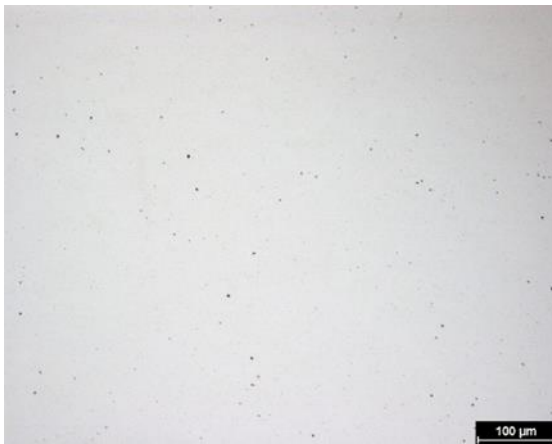
Obr. 23 1000 °C - povrch - PN



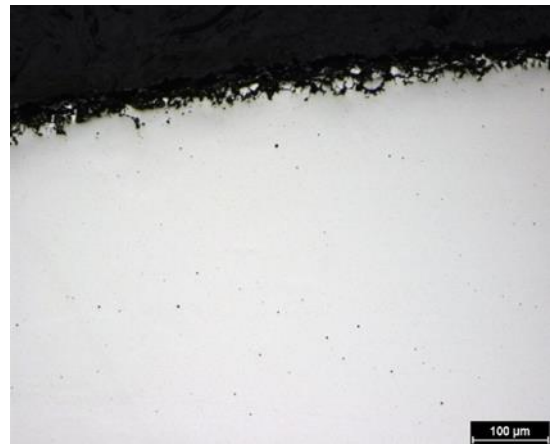
Obr. 24 1000 °C - jádro - PO



Obr. 25 1000 °C - povrch - PO



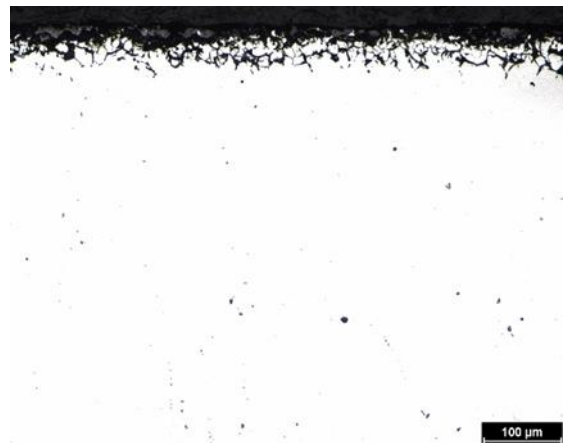
Obr. 26 1050 °C - jádro - PN



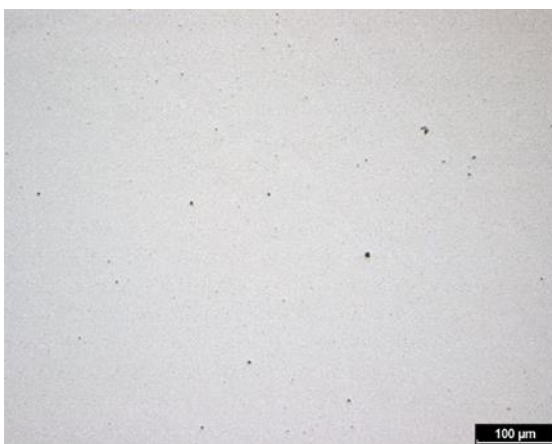
Obr. 27 1050 °C - povrch - PN



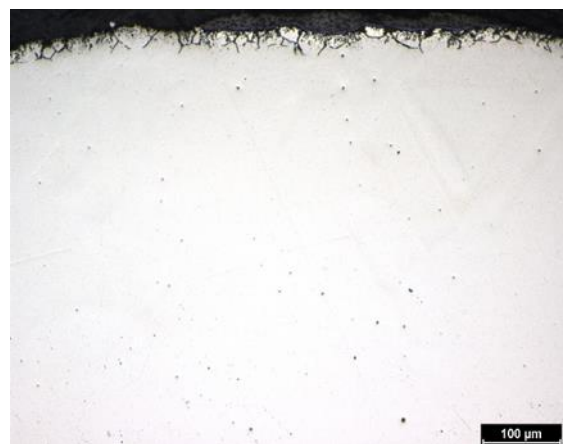
Obr. 28 1050 °C - jádro - PO



Obr. 29 1050 °C - povrch - PO



Obr. 30 1100 °C - jádro - PN

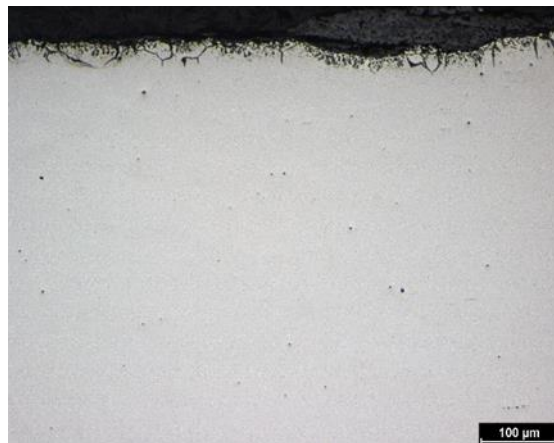


Obr. 31 1100 °C - povrch - PN

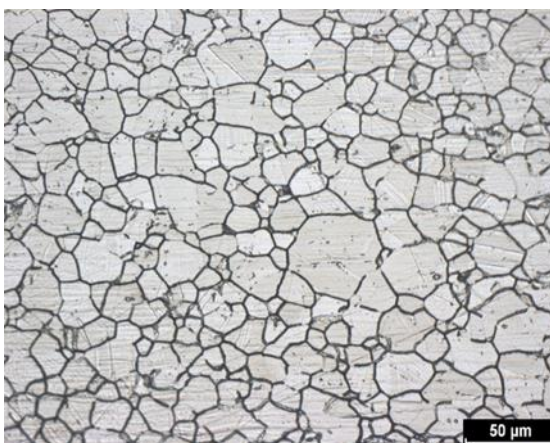




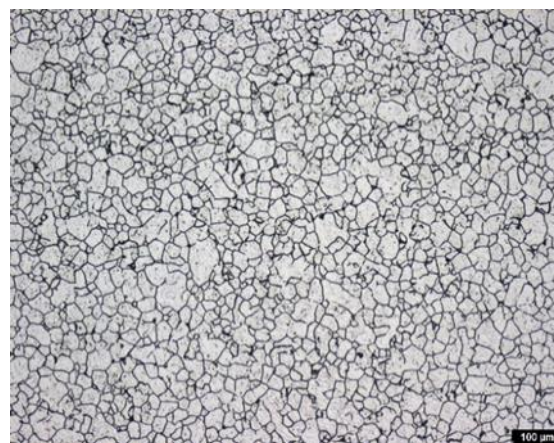
Obr. 32 1100 °C - jádro - PO



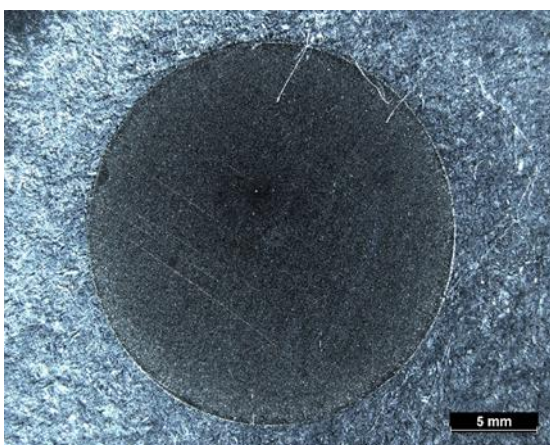
Obr. 33 1100 °C - povrch - PO



Obr. 34 pokojová teplota - jádro



Obr. 35 pokojová teplota - jádro



Obr. 36 1000 °C - makrosnímek

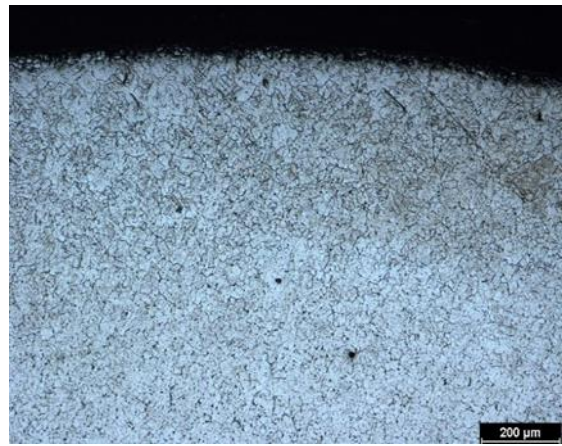


Obr. 37 1000 °C - povrch

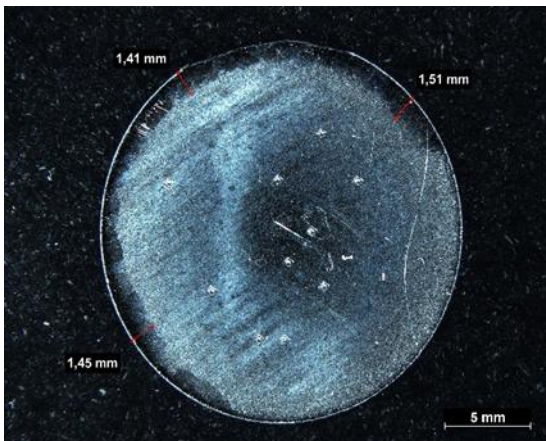




Obr. 38 1000 °C -jádro



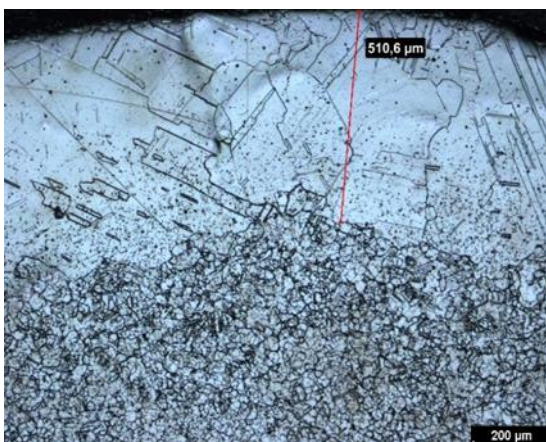
Obr. 39 1000 °C -povrch



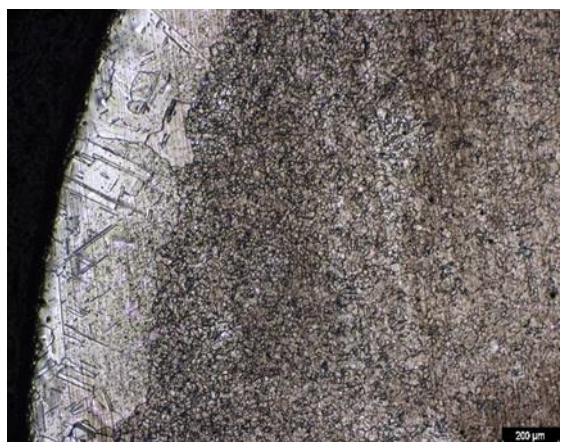
Obr. 40 1050 °C -makrosnímek (vytvořená vrstva)



Obr. 41 1050 °C -jádro

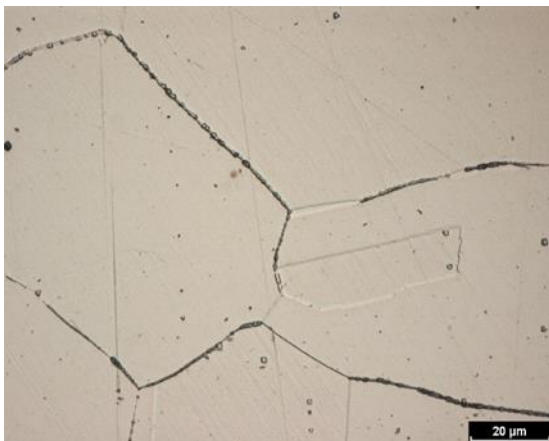


Obr. 42 1050 °C -povrch (vytvořená vrstva)

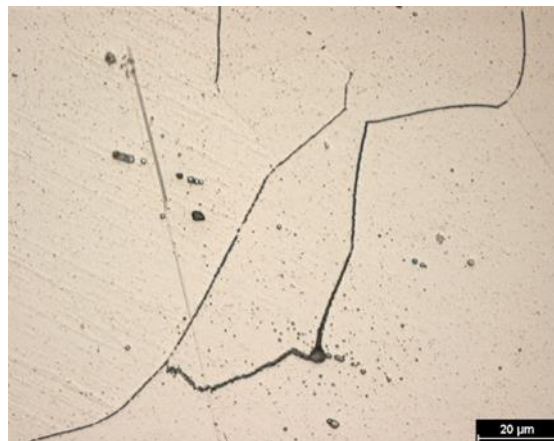


Obr. 43 1050 °C -povrch(vytvořená vrstva)

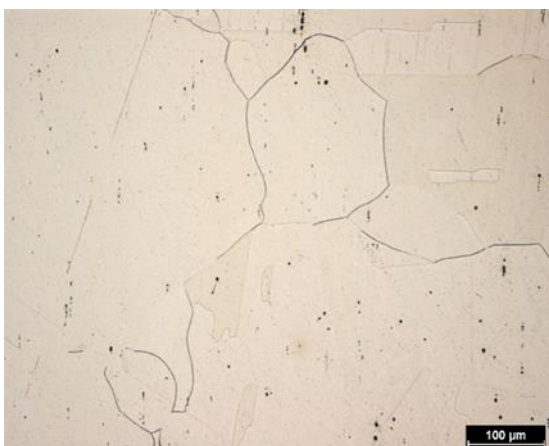




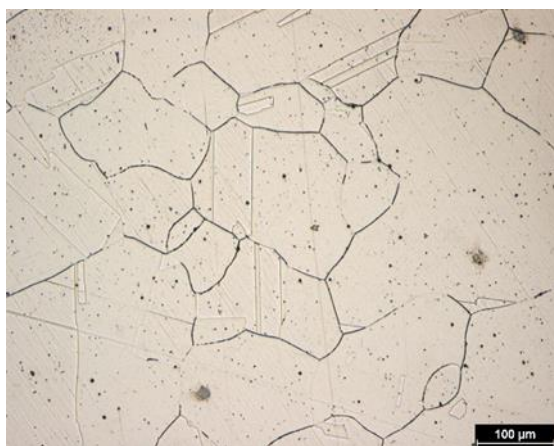
Obr. 44 1100 °C -jádرو



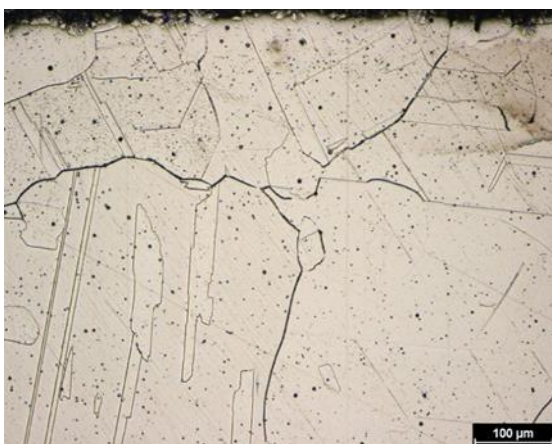
Obr. 45 1100 °C -jádرو



Obr. 46 1100 °C -jádرو



Obr. 47 1100 °C -jádرو



Obr. 48 1100 °C -povrch



### 3.1.1 Určení velikosti zrna

Pro stanovení velikosti zrna byla použita srovnávací metoda, kdy se velikost zrna stanovuje srovnáním metalografického výbrusu při stonásobném zvětšení s etalony normalizovaných struktur označených čísly G.

Stanovení velikosti zrna bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 643 [15]. Tato mezinárodní norma specifikuje mikrografickou metodu stanovení velikosti feritických nebo austenitických zrn v ocelích. Popisuje metody zviditelnění hranic zrn a určení průměrné velikosti zrna u vzorků se shodnou distribucí velikosti. Velikosti zrn pro jednotlivé vzorky zcitlivěné různou teplotou jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 8). [17].

Tab. 8 Velikost zrna [15]

Teplota [°C]	Pokožová		1000		1050		1100
	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Jádro	Povrch	Celý objem
Velikost zrna G	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	3,0	1-1,5
Střední průměr zrna $\bar{d}$ [mm]	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,125	0,250-0,200

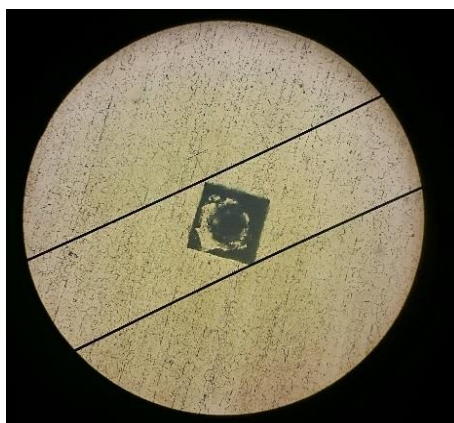
Naměřené hodnoty dokládají, že velikost zrna je vzorků až do teploty 1000 °C ( $G = 7,5$ ). Nad touto teplotou začíná zrno hrubnout nejprve u povrchu ( $G = 3,0$ ) a při 1100 °C zhrubne v celém objemu ( $G = 1-1,5$ ).

### 3.2 Určení mechanických vlastností

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse [16] a zkouška tahem [18].

### 3.2.1 Zkouška tvrdosti

Pro zkoušku tvrdosti byly použity vzorky, na kterých již byla provedena strukturní analýza. Malé plochy těchto vzorků neumožnili zkoušku tvrdosti dle Brinella, a tak byly naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse následně převedeny na tvrdost dle Brinella, pro možnost porovnání s předepsanými hodnotami dle normy ČSN EN ISO 6507-1 [16]. Na všech vzorcích byla provedena kontrola tvrdosti pěti měřeními v obou orientacích (PO, PN). Výsledné hodnoty byly zprůměrovány a jsou uvedeny v následující tabulce včetně směrodatných odchylek (Tab. 9).



Obr. 49 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tab. 9 Výsledné hodnoty pro měření tvrdosti

Teplota [°C]	pokožová	1000	1050	1100
HB [MPa] naměřené hodnoty	215	152	150	126
	212	154	149	130
	218	156	151	125
	214	155	148	131
	215	156	152	129
HBS[MPa] průměrná hodnota	214,8	154,6	150,0	128,2
HBS [MPa]	<b>214,80 ± 1,94</b>	<b>154,60 ± 1,50</b>	<b>150,00 ± 1,41</b>	<b>128,20 ± 2,32</b>

Z výsledků jasně plyne, že se zvyšující se teplotou klesá tvrdost materiálu. Výsledky splňují předepsanou hodnotou tvrdosti, která činí maximálně 223 HB.

### 3.2.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem je nejčastěji používanou statickou zkouškou k hodnocení pevnosti a plasticity materiálu, která se provádí dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [18]. Stanovují se mechanické vlastnosti. Vzorce (1-5) pro určení těchto vlastností [17]:

$$\text{Mez kluzu} \quad R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [MPa] \quad (1)$$

$$\text{Smluvní mez kluzu} \quad R_{P0,2} = \frac{F_{P0,2}}{S_0} \quad [MPa] \quad (2)$$

$$\text{Mez pevnosti v tahu} \quad R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa] \quad (3)$$

$$\text{Tažnost} \quad A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$\text{Kontrakce} \quad S = \frac{(S_u - S_0)}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

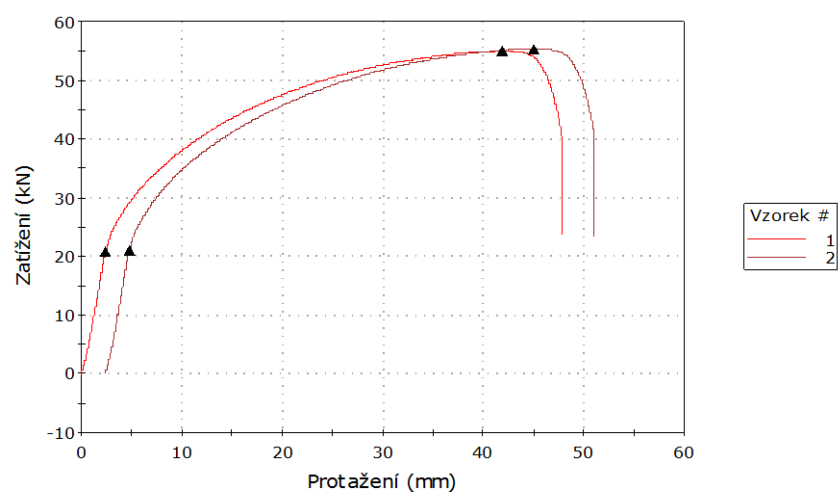
V případě této zkoušky byly použity tyče kruhového průřezu o  $\varnothing$  10 mm s délkou 100 mm. Zkouška byla provedena pomocí univerzálního trhacího stroje INSTRON 5582. Od každé teploty byly přetrhnuty dva vzorky. Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky jsou zobrazeny v následující tabulce včetně směrodatných odchylek (Tab. 10). Pracovní tahový diagram pro sadu dvou vzorků, které byly zcitlivěny při teplotě 1050 °C je uveden na obrázku (Obr. 50).

Z vyhodnocení tahové zkoušky lze usuzovat, že čím vyšší teplotou materiál zcitlivíme, tím více klesají pevnostní charakteristiky materiálu ( $R_m$ ,  $R_{P0,2}$ ) a naopak roste houževnatost, jak můžeme vidět v následující tabulce (Tab. 10). Výsledky dokládají, že požadované mechanické vlastnosti byly splněny při všech teplotách zcitlivění. Lišily se pouze hodnoty za pokojové teploty, a to celkem podstatně. Tento fakt lze přikládat tomu, že materiál nebyl nijak teplotně zcitlivěn, a tudíž nedošlo k tepelnému ovlivnění struktury materiálu. Ten si zachovává velikost zrna a příčinou růstu vakancí a projevem dislokací klesají mechanické vlastnosti.

Tab. 10 Naměřené a vypočítané hodnoty tahové zkoušky

Teplota [°C]	pokojová	1000	1050	1100
Mez kluzu [MPa]	438,1 503,7	271,7 266,6	263,9 266,3	223,3 222,9
Mez pevnosti [MPa]	796,1 832,4	711,5 709,2	700,1 704,8	630,7 633,3
Mez kluzu [MPa]	<b>470,9 ± 32,8</b>	<b>269,2 ± 2,6</b>	<b>265,1 ± 1,2</b>	<b>223,1 ± 0,2</b>
Mez pevnosti [MPa]	<b>814,3 ± 18,2</b>	<b>710,4 ± 1,2</b>	<b>702,5 ± 2,4</b>	<b>631,9 ± 1,2</b>
Tažnost [%]	<b>25,23</b>	<b>36,12</b>	<b>38,89</b>	<b>47,50</b>
Kontrakce [%]	<b>53,51</b>	<b>61,51</b>	<b>69,30</b>	<b>72,75</b>

Síla - deformace



Obr. 50 Pracovní tahový diagram pro sadu vzorků zcitlivěných teplotou 1050 °C

## 4 Diskuse a závěr

V experimentální části jsem se zabýval dodanou ocelí 1.4828, která má odolnost proti oxidaci za zvýšených teplot na vzduchu do teploty 1000 °C. Připraveno bylo pět sad vzorků po třech kusech. Dva kusy z každé sady byly použity pro tahovou zkoušku a třetí na strukturní analýzu, po které následovala zkouška tvrdosti. Pro zjištění pevnostních charakteristik, byla provedena zkouška tahem. Použity byly tyče kruhového průřezu o  $\varnothing$  10 mm s délkou 100 mm. Pro strukturní analýzu a zkoušku tvrdosti byly vzorky nejprve nařezány v podélném a příčném směru a poté zalisovány do bakelitových puků. Následně vybroušeny, vyleštěny a elektrolyticky naleptány. První sada vzorků byla zcitlivěna teplotou 950 °C, avšak po neznámém časovém intervalu se vypnula pec a vzorky tudíž byly znehodnoceny a pro další operace se staly nepoužitelnými. Pro zopakování pokusu nezbyl další materiál.

Na teplotně zcitlivěných vzorcích byla provedena strukturní analýza pomocí světelné mikroskopie v leštěném a elektrolyticky naleptaném stav, jak v PO, tak PN směru. U všech vzorků byla sledována austenitická struktura a také oxidické vměstky a karbidy. Na dokumentovaných mikrostrukturách je vidět, že až do teploty 1000 °C je velikost zrna ( $G = 7,5$ ). Nad touto teplotou začíná zrno hrubnout nejprve u povrchu (při teplotě 1050 °C je  $G = 3,0$ ) a při 1100 °C zhrubne v celém objemu ( $G = 1-1,5$ ).

V další části experimentu byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti materiálu (zkouška tvrdosti a tahová zkouška). Na všech vzorcích (jak v PO, tak PN směru) byla provedena kontrola tvrdosti pěti měřeními dle Vickerse a následně převedeny na tvrdost dle Brinella. Výsledky prokázaly dodržení požadovaných hodnot dle příslušné normy pro ocel 1.4828. Normová hodnota tvrdosti činí maximálně 223 HB. Tato hodnota nebyla žádným měřením překročena, tudíž tvrdost odpovídá předepsané hodnotě dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Nejvyšší naměřená hodnota je  $214,80 \pm 1,94$  HB. Tato hodnota byla změřena pro vzorek, který odpovídal pokojové teplotě. S dalších měření vyplynulo, že čím vyšší teplotou je ocel zcitlivěna, tím nižší je hodnota její tvrdosti. Pro vzorek, který byl zcitlivěn při teplotě 1100 °C, už činí hodnota tvrdosti pouze  $128,20 \pm 2,32$  HB.

Zkouška tahem byla provedena na dvou vzorcích od každé teploty (pokojová až 1100 °C). Z vyhodnocení tahové zkoušky lze usuzovat, že čím vyšší teplotou materiál zcitlivíme, tím nižší jsou jeho pevnostní charakteristiky materiálu ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ), a naopak roste houževnatost. Výsledky dokládají, že požadované mechanické vlastnosti byly splněny u všech teplot zcitlivění. Lišily se pouze hodnoty za pokojové teploty, a to celkem výrazně.

Předmětem bakalářské práce bylo vypracování teoretické a experimentální části na téma žáruvzdorné oceli pro energetický průmysl. V teoretické části jsem nejprve nastudoval odbornou literaturu a následně vypracoval literární rešerši k této oblasti.

Z experimentální části vyplívá, že zkoumaná ocel 1.4828, jež je použita na předeříváky vzduchu parních kotlů vyhovuje provozním podmínkám do teploty 1000 °C, na kterou je navržena. Nad touto teplotou se stává díky teplotnímu zcitlivění nepoužitelnou. Hlavním projevem je hrubnutí zrn a klesání hodnot mechanických vlastností.

Vzhledem k tomu, že se jedná o vstupní studii k dané problematice, vzniká prostor pro navázání řešení dalších prací, které by mohly například porovnávat výsledky oceli 1.4828, která má austenitickou strukturu s feritickými nebo austeniticko-feritickými žáruvzdornými ocelmi nebo dalším materiálem. Možností může být i srovnání materiálu s vytvořeným materiálem pomocí 3D tisku, který představuje perspektivnost do budoucna.

## 5 Použitá literatura

[1] POSPÍŠIL, Rudolf. *Antikoroze a žáruvzdorné oceli: určeno inženýrům, technikům a výrobním kádram v průmyslu i posluchačům vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. Řada hutnické literatury.

[2] *Creep-resistant steels*. Editor Torsten-Ulf KERN, editor Ramaswamy VISWANATHAN. Cambridge: Woodhead, 2008. ISBN 978-1-84569-178-3. [online]. [cit. 2017-06-20]

Dostupné z:

[https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=koykAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=development+of+creep-resistant+steels+and+alloys+for+use+in+power+plants&ots=\\_DlwxyHNB\\_&sig=zD6zj5CLGBRYTk8oOYFeC\\_rwcVg&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=koykAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=development+of+creep-resistant+steels+and+alloys+for+use+in+power+plants&ots=_DlwxyHNB_&sig=zD6zj5CLGBRYTk8oOYFeC_rwcVg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

[3] MASUYAMA, Fujimitsu. *History of power plants and progress in heat resistant steels* [online]. In: [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/41/6/41\\_6\\_612/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/41/6/41_6_612/_pdf)

[4] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0.

[5] ČSN EN 10095. *Oceli a niklové slitiny žáruvzdorné*. Český normalizační institut, 2000.

[6] Vliv tepelného zpracování na strukturu okujové vrstvy a její odstranění mořením v redukční tavenině. In: *Www.integrita.zcu.cz* [online]. [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: [https://www.integrita.zcu.cz/download/skola2/ostrava\\_prez2.pdf](https://www.integrita.zcu.cz/download/skola2/ostrava_prez2.pdf)

[7] KAREL MACEK .. [AJ.]. *Kovové materiály*. Praha: Čes. vys. učení techn, 1991. ISBN 8001006824.

[8] MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.

[9] Schaefflerův diagram. In: *Http://www.pipe.info* [online]. [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: <http://www.pipe.info/images/stainless.bmp>

[10] Energetika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Energetika>

- [11] Tepelná elektrárna. In: *Http://kke.zcu.cz* [online]. [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: [http://kke.zcu.cz/old\\_web/\\_files/projekty/enazp/07/MMP/047\\_Tepelna\\_elektrarna.ppt](http://kke.zcu.cz/old_web/_files/projekty/enazp/07/MMP/047_Tepelna_elektrarna.ppt).
- [12] KRÁTKY, Ivan. *Materiály tepelných energetických strojov a zariadení*. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická, 1988. ISBN Materiály tepelných energetických.
- [13] Niklová slitina Ni-Cr-Fe. In: *Https://www.researchgate.net* [online]. [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/226218799\\_The\\_effect\\_of\\_strain\\_on\\_the\\_trapping\\_of\\_hydrogen\\_at\\_grain-boundary\\_carbides\\_in\\_Ni-Cr-Fe\\_alloys](https://www.researchgate.net/publication/226218799_The_effect_of_strain_on_the_trapping_of_hydrogen_at_grain-boundary_carbides_in_Ni-Cr-Fe_alloys)
- [14] *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity*. Praha: Dashöfer, c2000. ISBN 8086229025.
- [15] ČSN EN ISO 643. *Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn*. Český normalizační institut. 2003.
- [16] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Český normalizační institut, 2006.
- [17] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2
- [18] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.



## Seznam obrázků

Obr. 1 Vývoj feritických ocelí pro parní kotle [3] .....	10
Obr. 2 Vývoj austenitických ocelí pro parní kotle [3] .....	10
Obr. 3 Struktura okujové vrstvy [6] .....	11
Obr. 4 Fázový diagram Fe-O [4] .....	12
Obr. 5 Schéma oxidické vrstvy a znázornění difúzního pochodu u železa [7] .....	12
Obr. 6 Schéma oxidické vrstvy a znázornění difúzního pochodu u slitiny Fe-Cr [7] .....	13
Obr. 7 Schaefflerův diagram [9] .....	15
Obr. 8 Schéma kondenzační elektrárna s regeneračním ohřevem vody [11] .....	16
Obr. 9 Schéma parní elektrárny [11] .....	17
Obr. 10 Ternární diagram Fe-Cr-C pro obsahy 8, 12, 15 a 20 % Cr [8] .....	19
Obr. 11 Vzhled mikrostruktury feritické korozivzdorné oceli [3] .....	20
Obr. 12 Vzhled mikrostruktury feritické korozivzdorné oceli [8] .....	20
Obr. 13 Vzhled mikrostruktury austenitické korozivzdorné oceli po rozpouštěcím žíhání [8] .....	21
Obr. 14 Vzhled mikrostruktury austenitické korozivzdorné oceli [3] .....	21
Obr. 15 Schematické znázornění přerozdělení uhlíku a chromu v oblasti vyloučeného karbidu na hranici zrna [8] .....	23
Obr. 16 Příklad mikrostruktury duplexní oceli (základní materiál) z teploty 1020 °C ochlazená a) do vody, b) s rychlostí ochlazování 20 °C.s <sup>-1</sup> [8] .....	23
Obr. 17 Vzhled mikrostruktury žáruvzdorné niklové slitiny Ni-Cr-Fe [13] .....	24
Obr. 18 Pokojová teplota - jádro - PN .....	27
Obr. 19 Pokojová teplota - povrch - PN .....	27
Obr. 20 Pokojová teplota - jádro - PO .....	28
Obr. 21 Pokojová teplota - povrch - PO .....	28
Obr. 22 1000 °C - jádro - PN .....	28
Obr. 23 1000 °C - povrch - PN .....	28
Obr. 24 1000 °C - jádro - PO .....	28
Obr. 25 1000 °C - povrch - PO .....	28
Obr. 26 1050 °C - jádro - PN .....	29
Obr. 27 1050 °C - povrch - PN .....	29
Obr. 28 1050 °C - jádro - PO .....	29
Obr. 29 1050 °C - povrch - PO .....	29
Obr. 30 1100 °C - jádro - PN .....	29
Obr. 31 1100 °C - povrch - PN .....	29
Obr. 32 1100 °C - jádro - PO .....	30
Obr. 33 1100 °C - povrch - PO .....	30
Obr. 34 pokojová teplota - jádro .....	30
Obr. 35 pokojová teplota - jádro .....	30
Obr. 36 1000 °C - makrosnímek .....	30
Obr. 37 1000 °C - povrch .....	30
Obr. 38 1000 °C - jádro .....	31
Obr. 39 1000 °C - povrch .....	31
Obr. 40 1050 °C - makrosnímek (vytvořená vrstva) .....	31
Obr. 41 1050 °C - jádro .....	31
Obr. 42 1050 °C - povrch (vytvořená vrstva) .....	31
Obr. 43 1050 °C - povrch (vytvořená vrstva) .....	31
Obr. 44 1100 °C - jádro .....	32
Obr. 45 1100 °C - jádro .....	32

Obr. 46 1100 °C -jádro .....	32
Obr. 47 1100 °C -jádro .....	32
Obr. 48 1100 °C -povrch .....	32
Obr. 49 Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	34
Obr. 50 Pracovní tahový diagram pro sadu vzorků zcitlivěných teplotou 1050 °C.....	36

## Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení materiálů pro části parních kotlů [5] .....	18
Tab. 2 Chemické složení žáruvzdorných feritických ocelí [5] .....	21
Tab. 3 Chemické složení austenitických žáruvzdorných ocelí [5].....	22
Tab. 4 Chemické složení austeniticko-feritické žáruvzdorné oceli [5] .....	24
Tab. 5 Chemické složení žáruvzdorných niklových slitin [5].....	25
Tab. 6 Předpis chemického složení oceli 1.4828 [14] .....	26
Tab. 7 Předpisy mechanických vlastností oceli 1.4828 [14] .....	26
Tab. 8 Velikost zrna [15].....	33
Tab. 9 Výsledné hodnoty pro měření tvrdosti .....	34
Tab. 10 Naměřené a vypočítané hodnoty tahové zkoušky.....	36